

UE CHM 2023 L
Verres Métaux Semi-Conducteurs et Céramiques

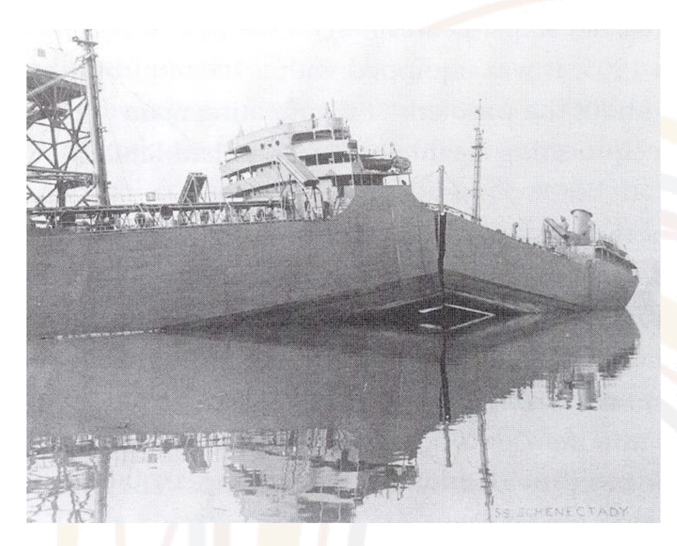
Propriétés mécaniques

Olivier DEZELLUS
Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces
Université Claude Bernard Lyon 1



Introduction

Pourquoi et comment ça casse ?



S.S. Schenectady (Liberty Ships) - 1943



Charles de Gaulle, Terminal 2E - 2004

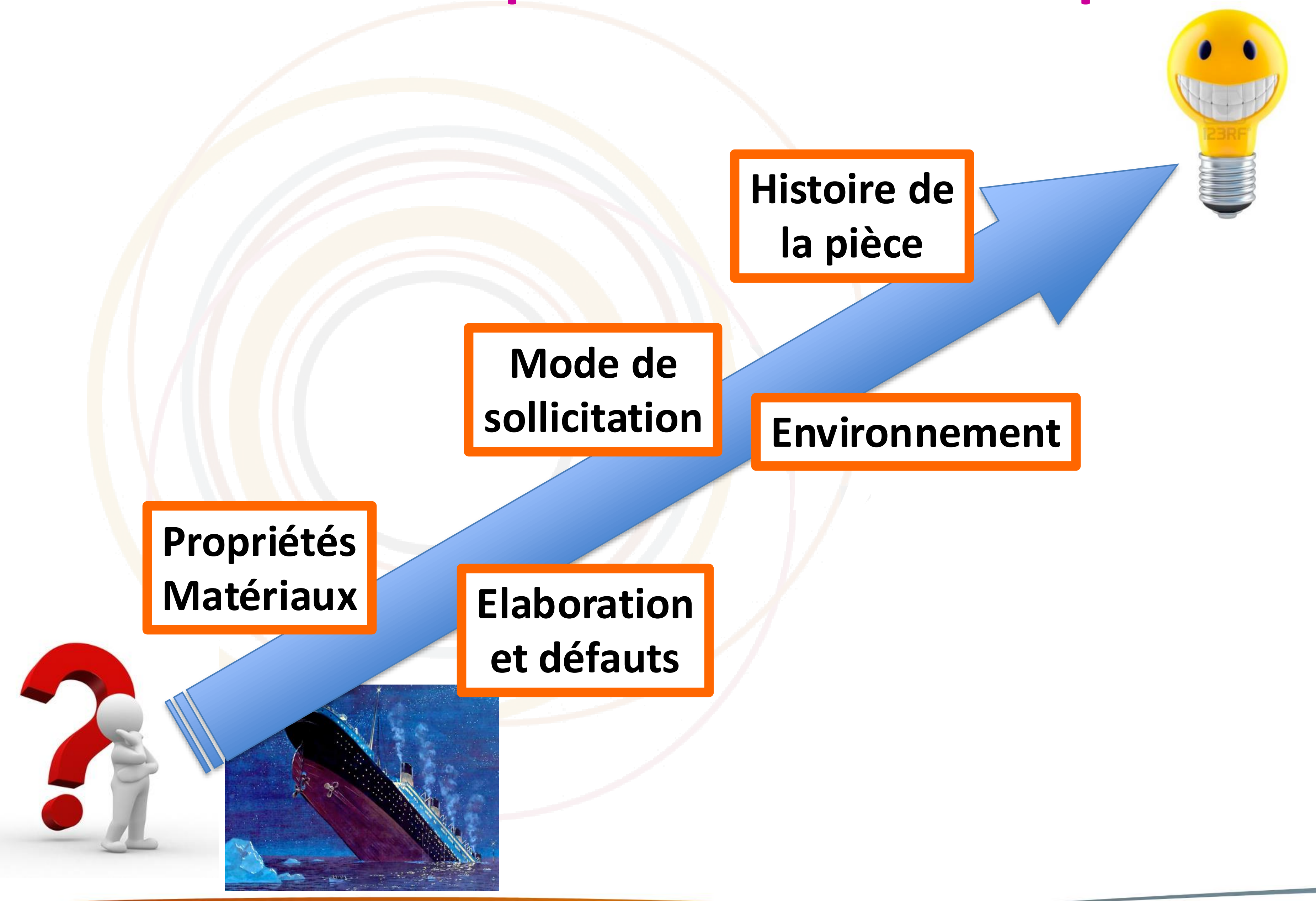


Tête de prothèse de hanche



Navette Challenger - 1986

Eléments de compréhension d'une rupture



Propriétés mécaniques: sommaire

Quelques grandeurs

Les propriétés élastiques

- Le module de Young
- La limite élastique
- La dureté

Les propriétés liées à l'endommagement

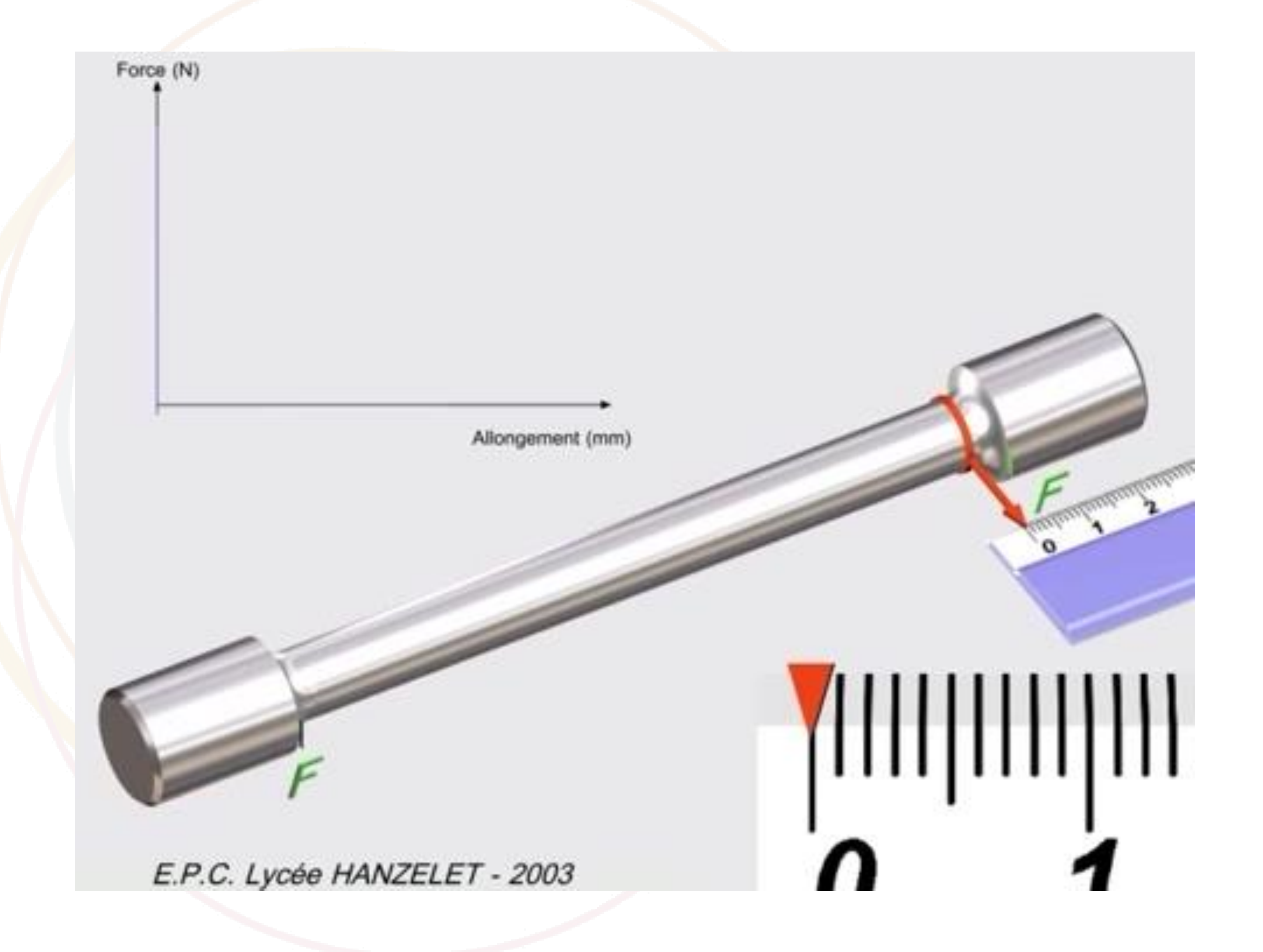
- rupture ductile/fragile
- allongement à rupture
- ténacité

Autres modes de sollicitation

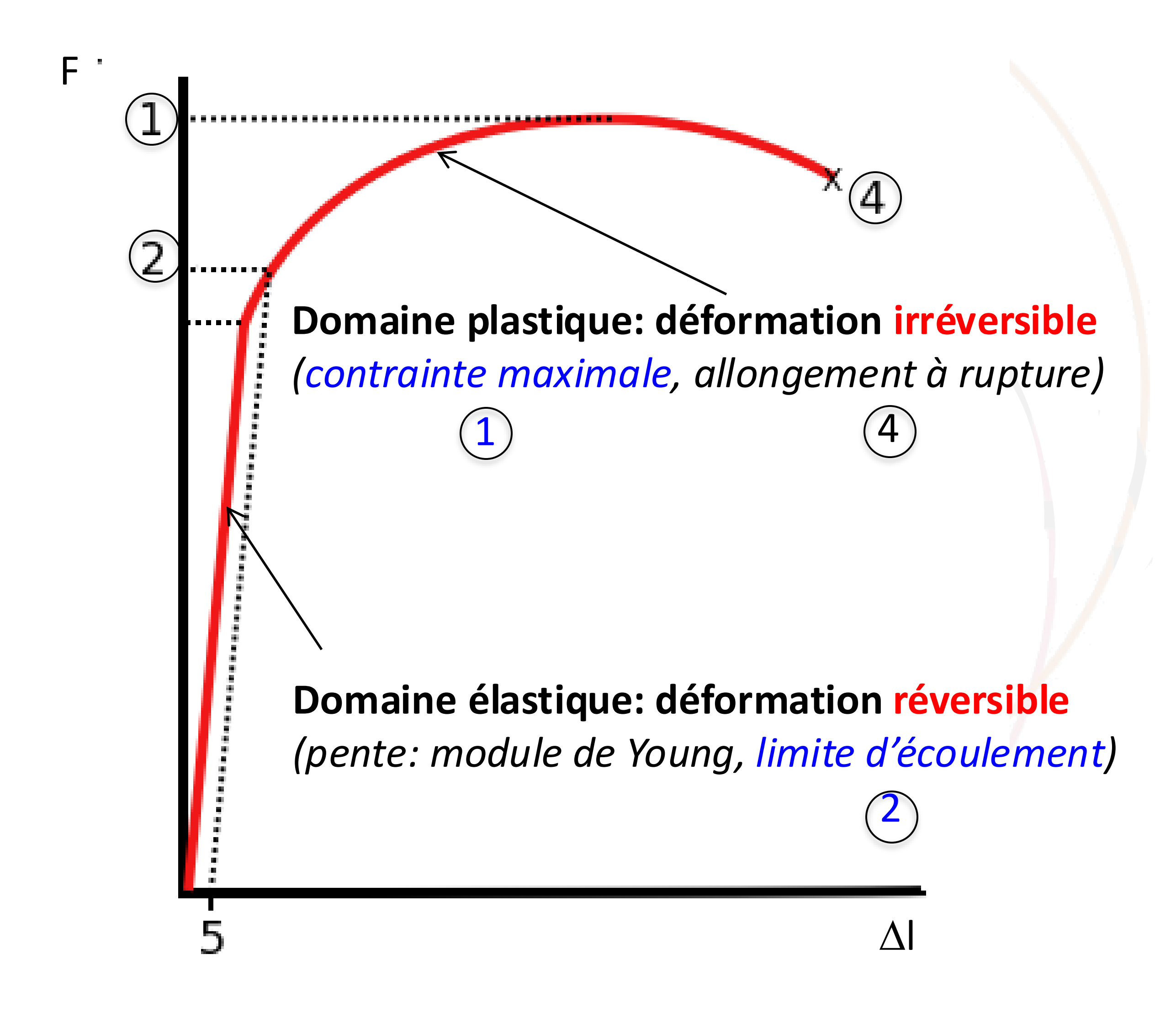
- influence de la température: le fluage
- influence du temps: la fatigue

Quelques grandeurs

L’essai de traction

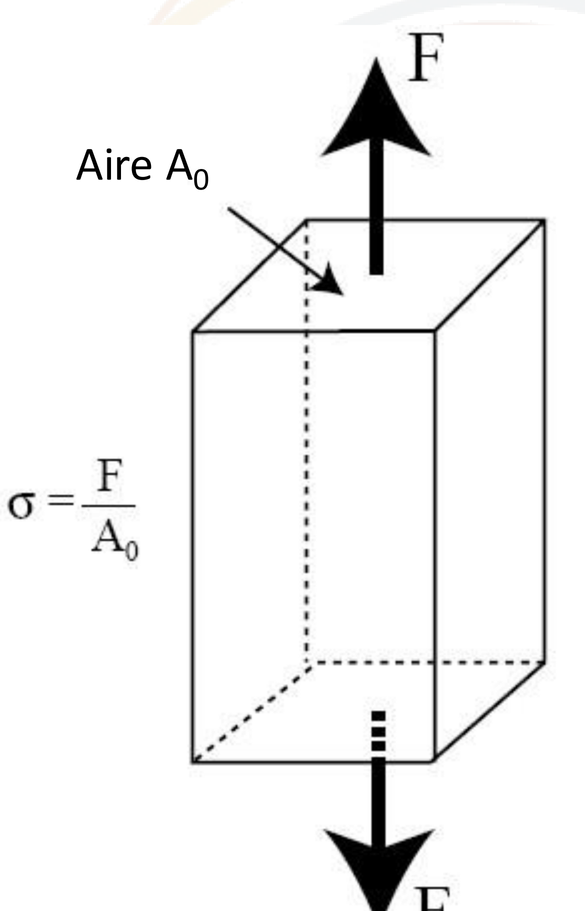


Courbe type d'un essai de traction (métal)

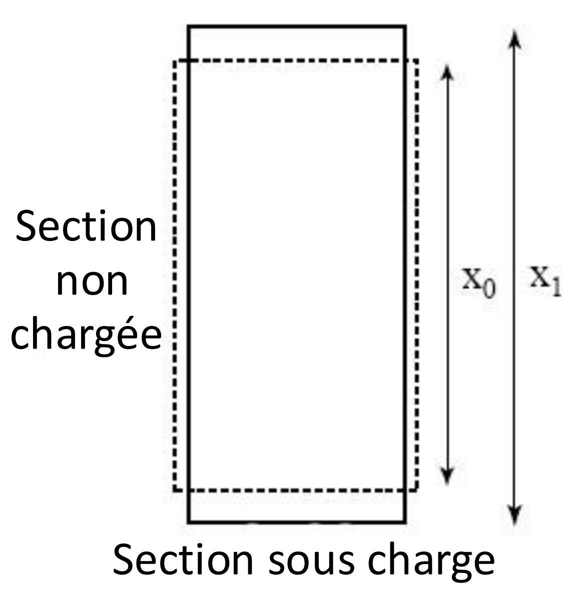


Contraintes et déformations

Mesure de la concentration locale des forces mécaniques
Adimensionalisation: accès à la caractéristique matériau



(déformation latérale) = -ν (déformation longitudinale)
Coefficient de Poisson

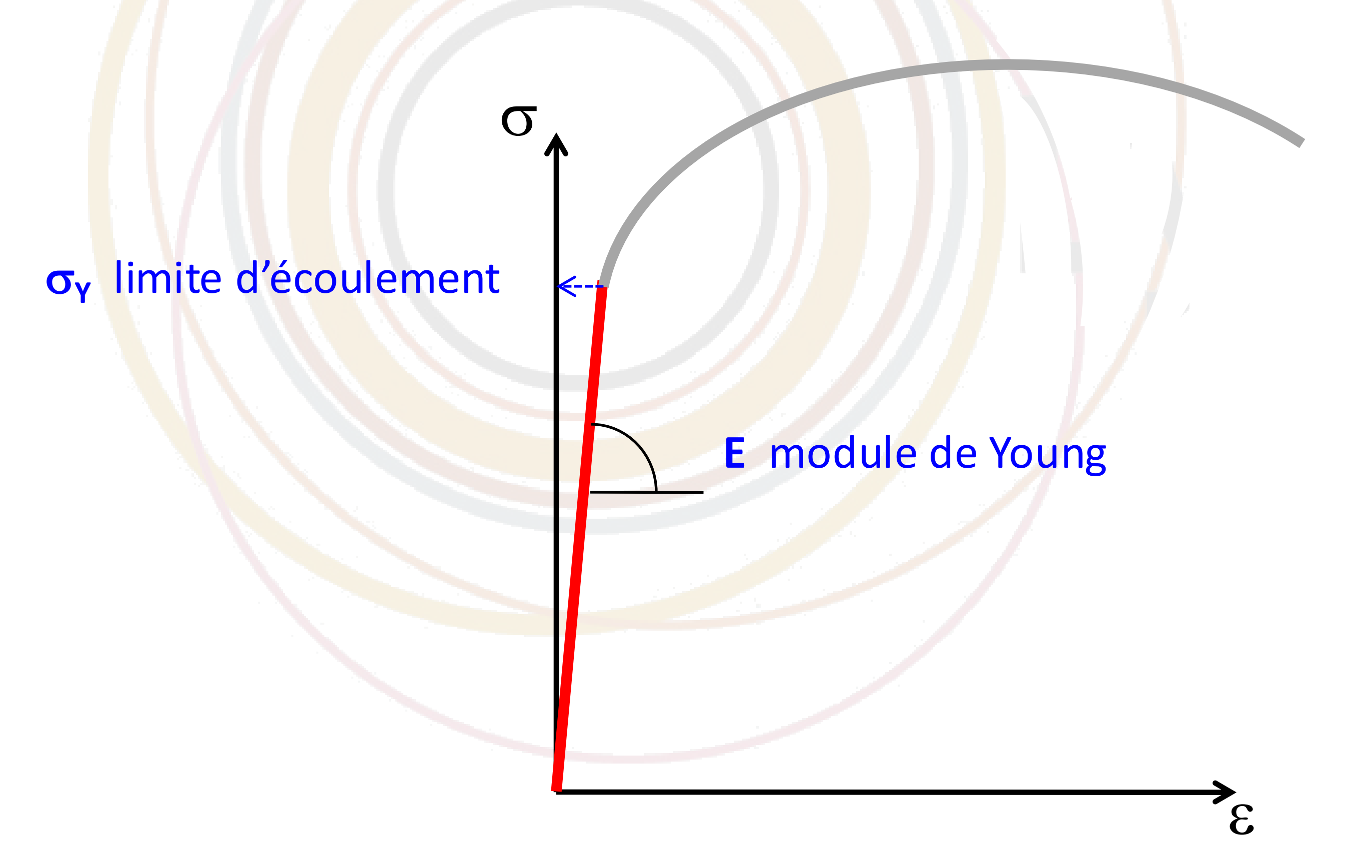


$$\varepsilon = \frac{x_1 - x_0}{x_0} = \frac{\Delta x_0}{x_0}$$

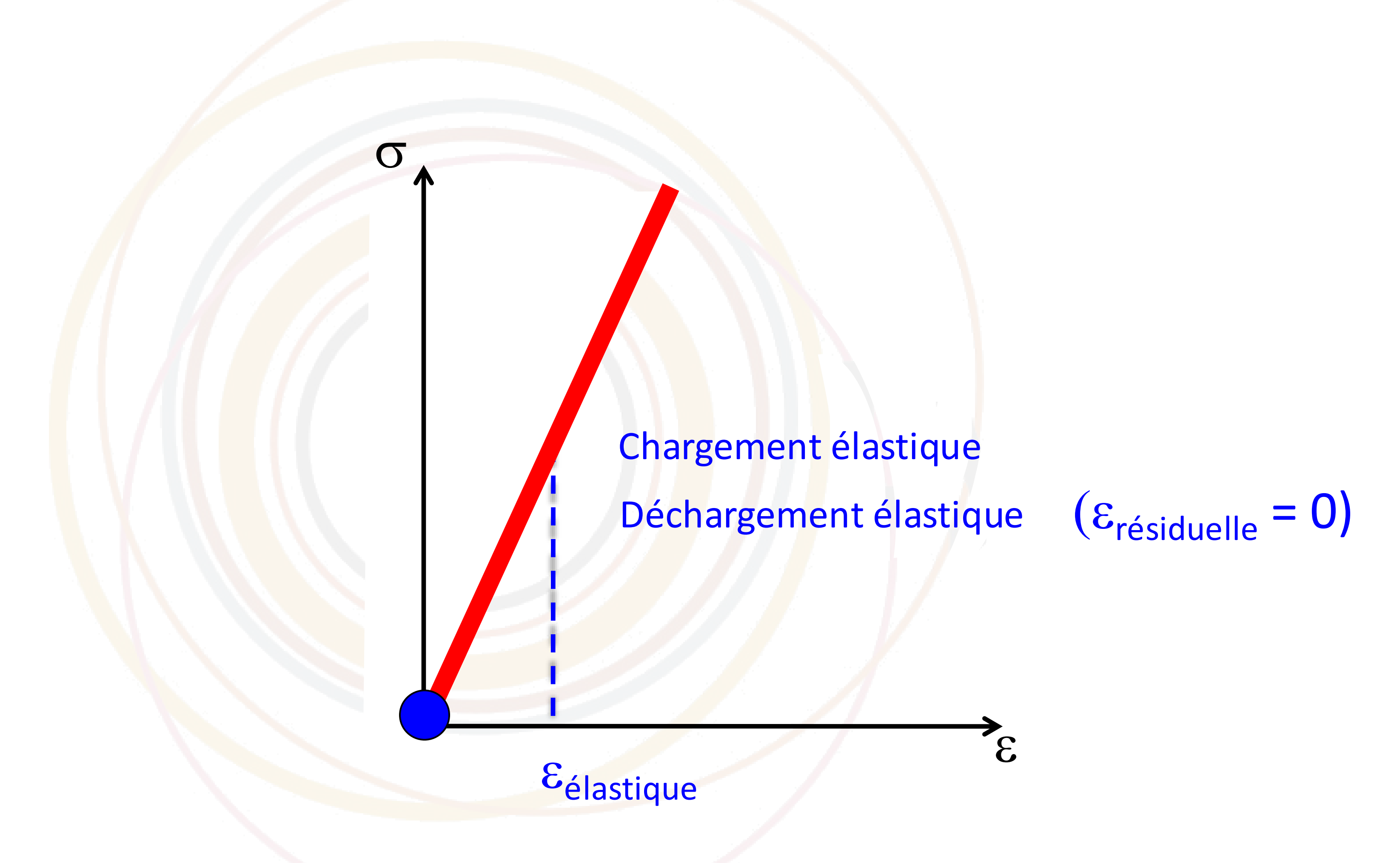
σ : contrainte nominale

ε : déformation nominale

Les propriétés élastiques

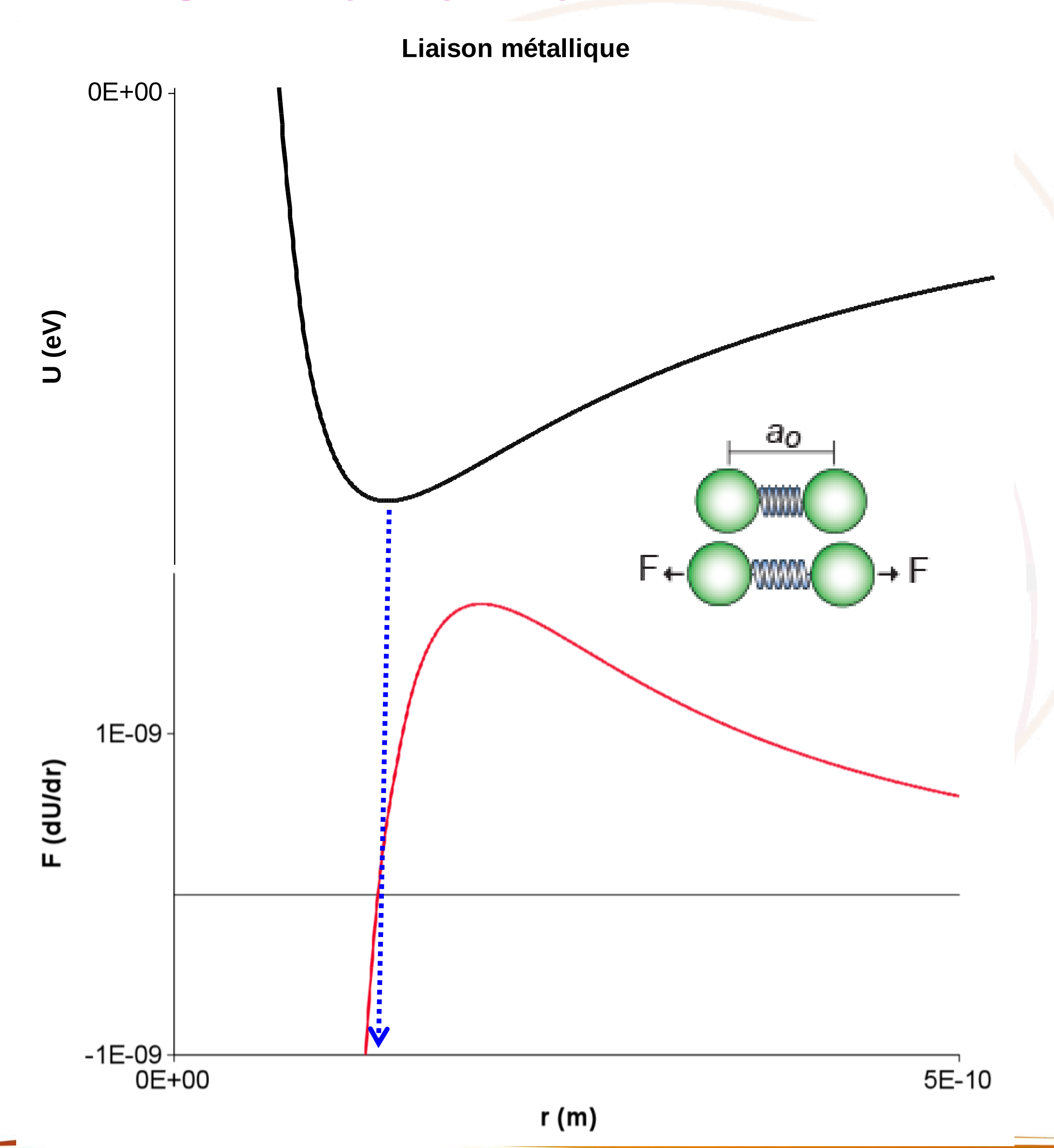


La déformation élastique est réversible



Loi de Hooke : $\sigma = E * \varepsilon$

Origine physique du module de Young



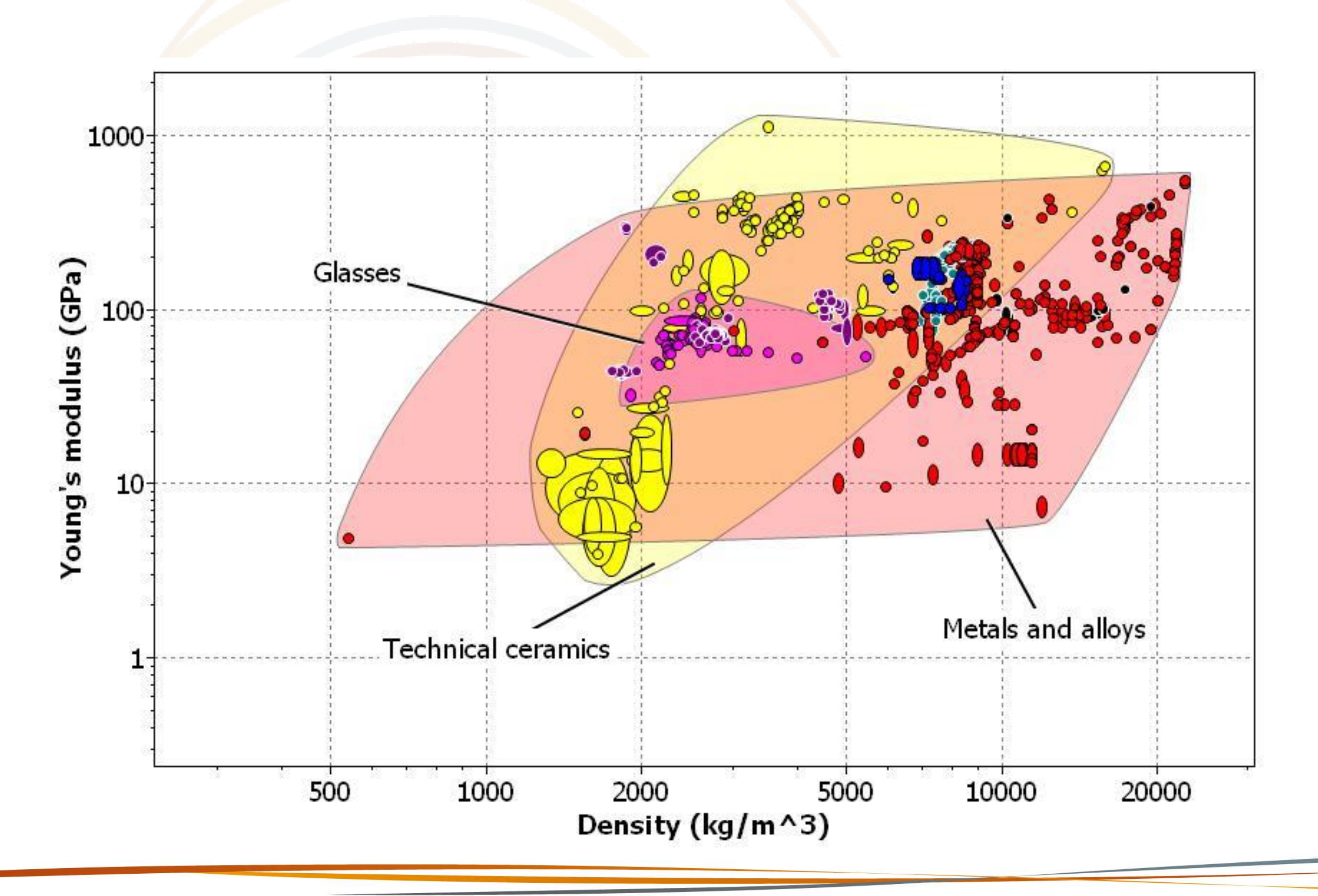
- Puits de potentiel = position d'équilibre

- La force dérive du potentiel

- Autour de la position d'équilibre: **<u>linéarité</u>** entre F et r comme entre σ et ε

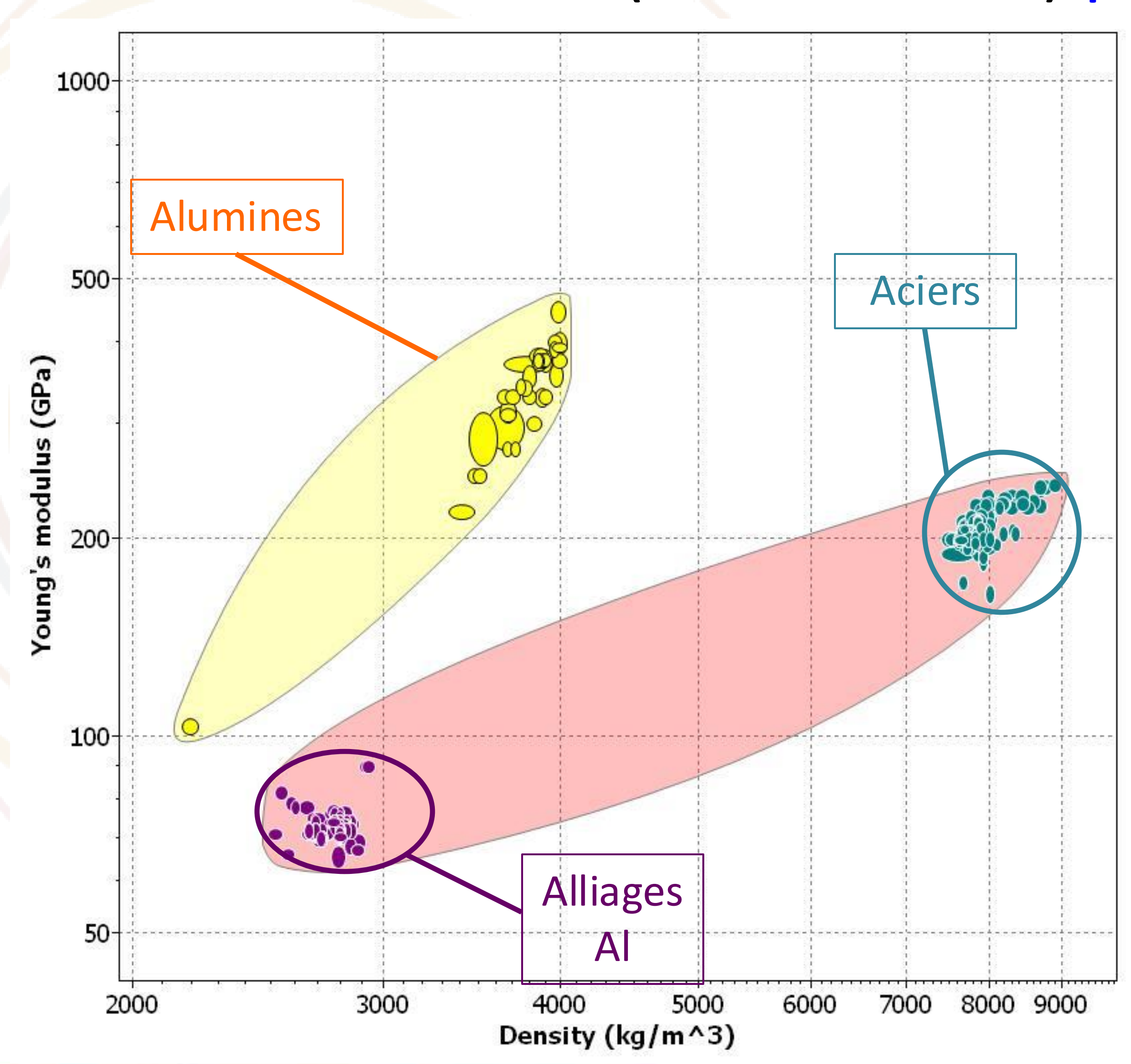
Le module de Young: valeurs

Une propriété étroitement liée à la chimie (nature de la liaison): petits cercles



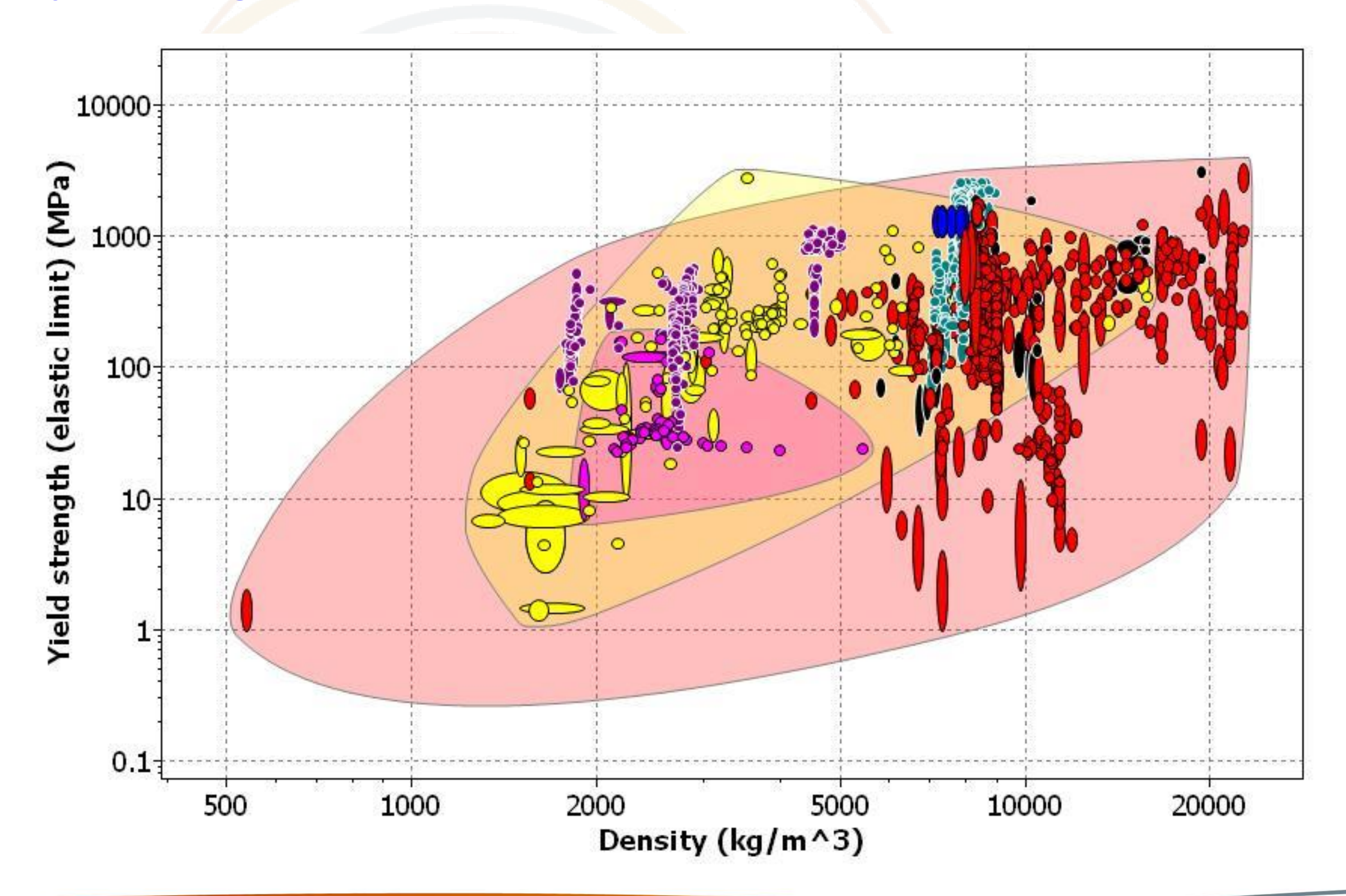
Le module de Young: variations

Une propriété étroitement liée à la chimie (nature de la liaison): petits cercles



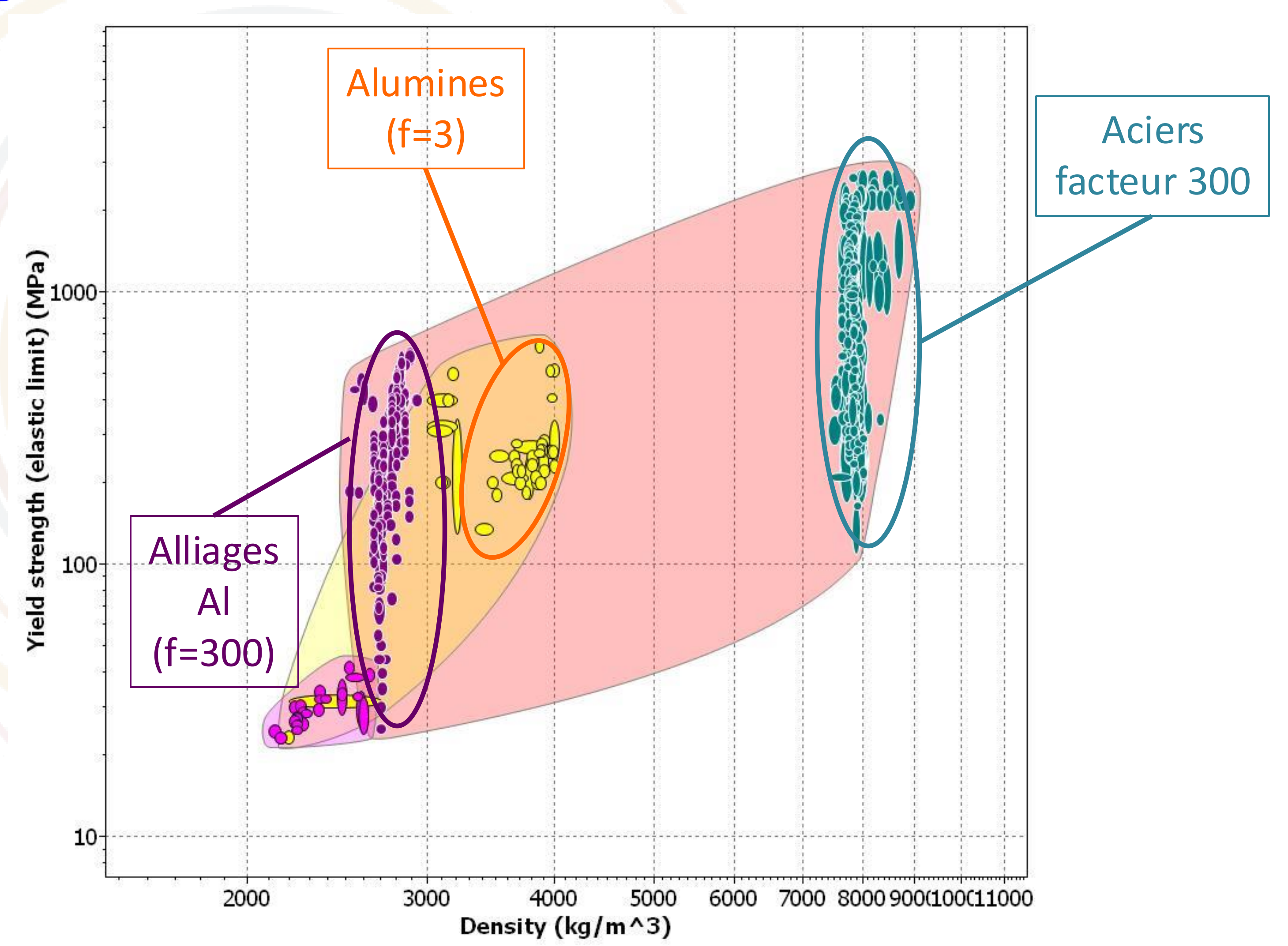
La limite élastique

Une propriété étroitement liée à la microstructure (agencement des phases):
ellipses allongées

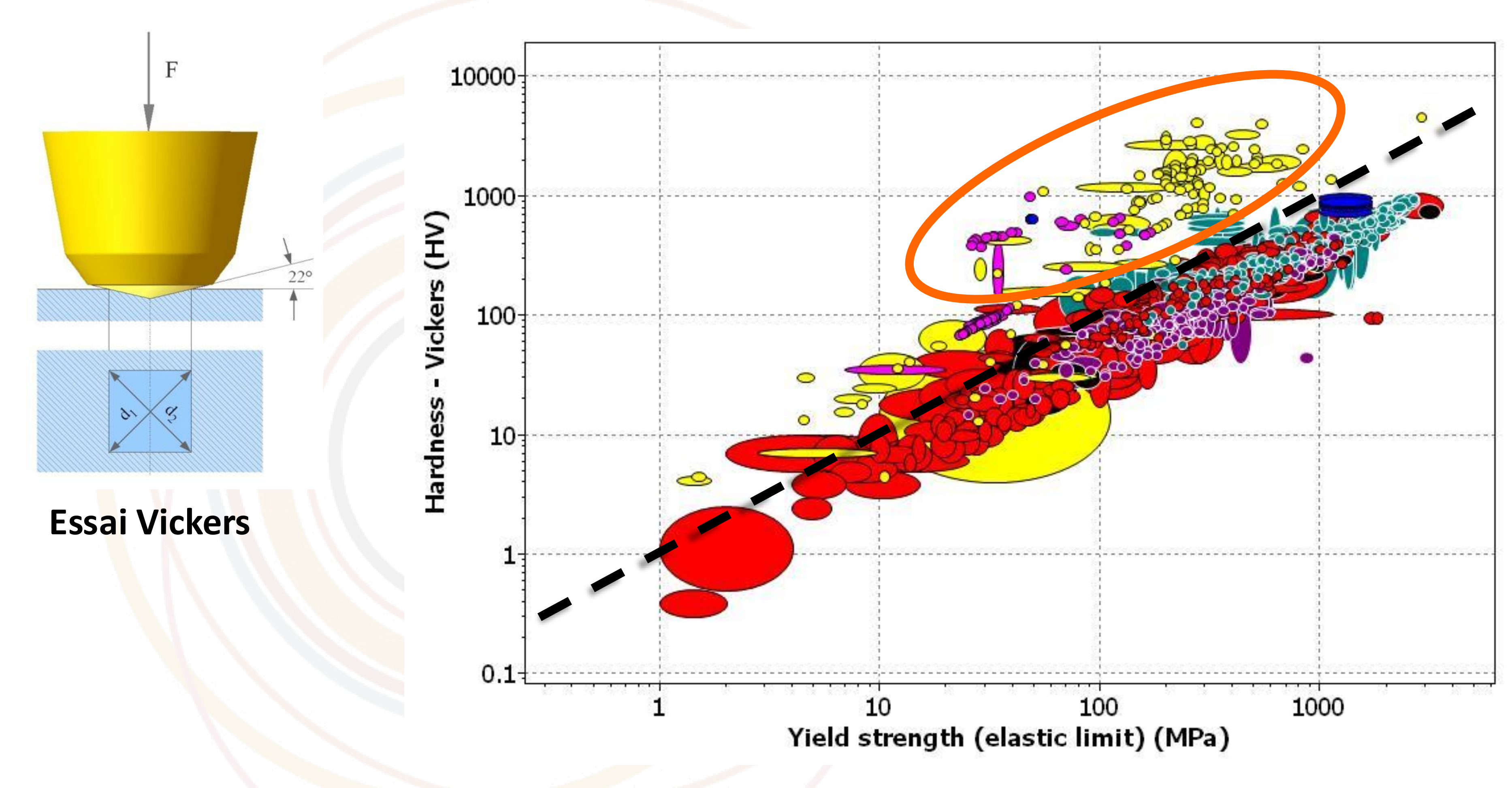


La limite élastique

Une propriété étroitement liée à la microstructure (agencement des phases):
ellipses allongées

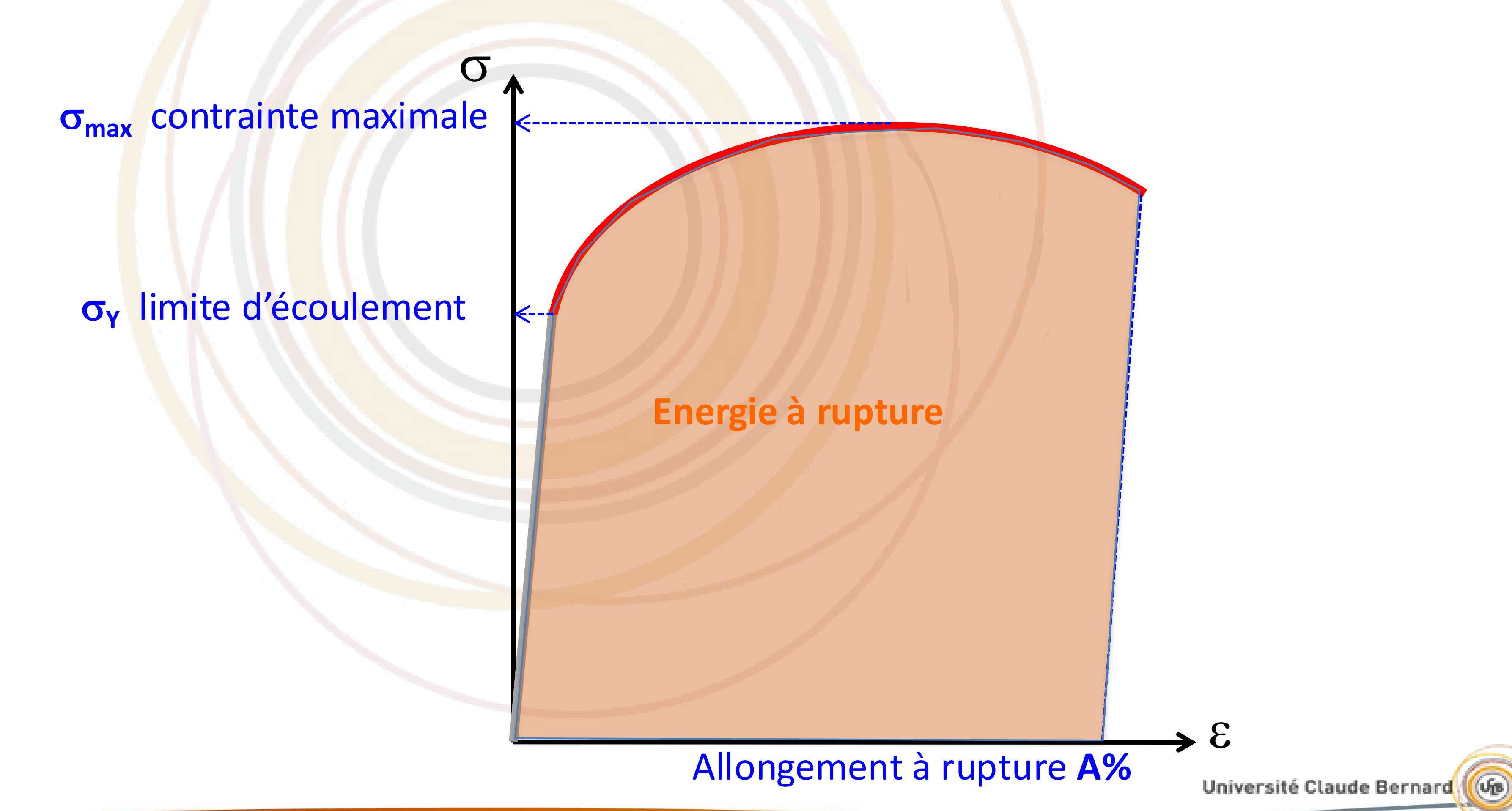


Mesures de dureté

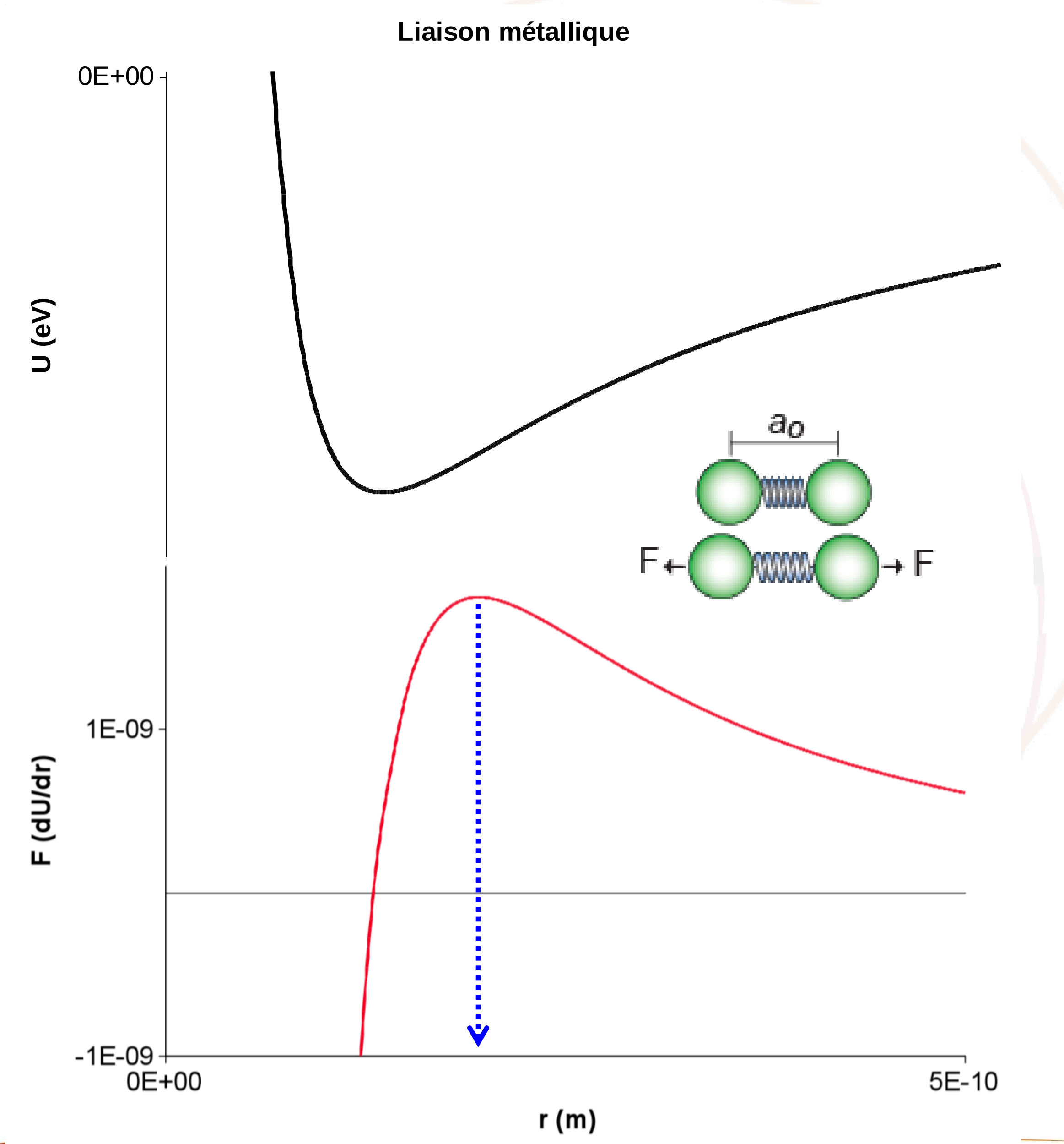


- La dureté augmente avec la limite élastique
- La dureté des céramiques est au-dessus de cette limite, celle des métaux est légèrement inférieure.

Les propriétés liées à l'endommagement



Contrainte à la rupture élastique



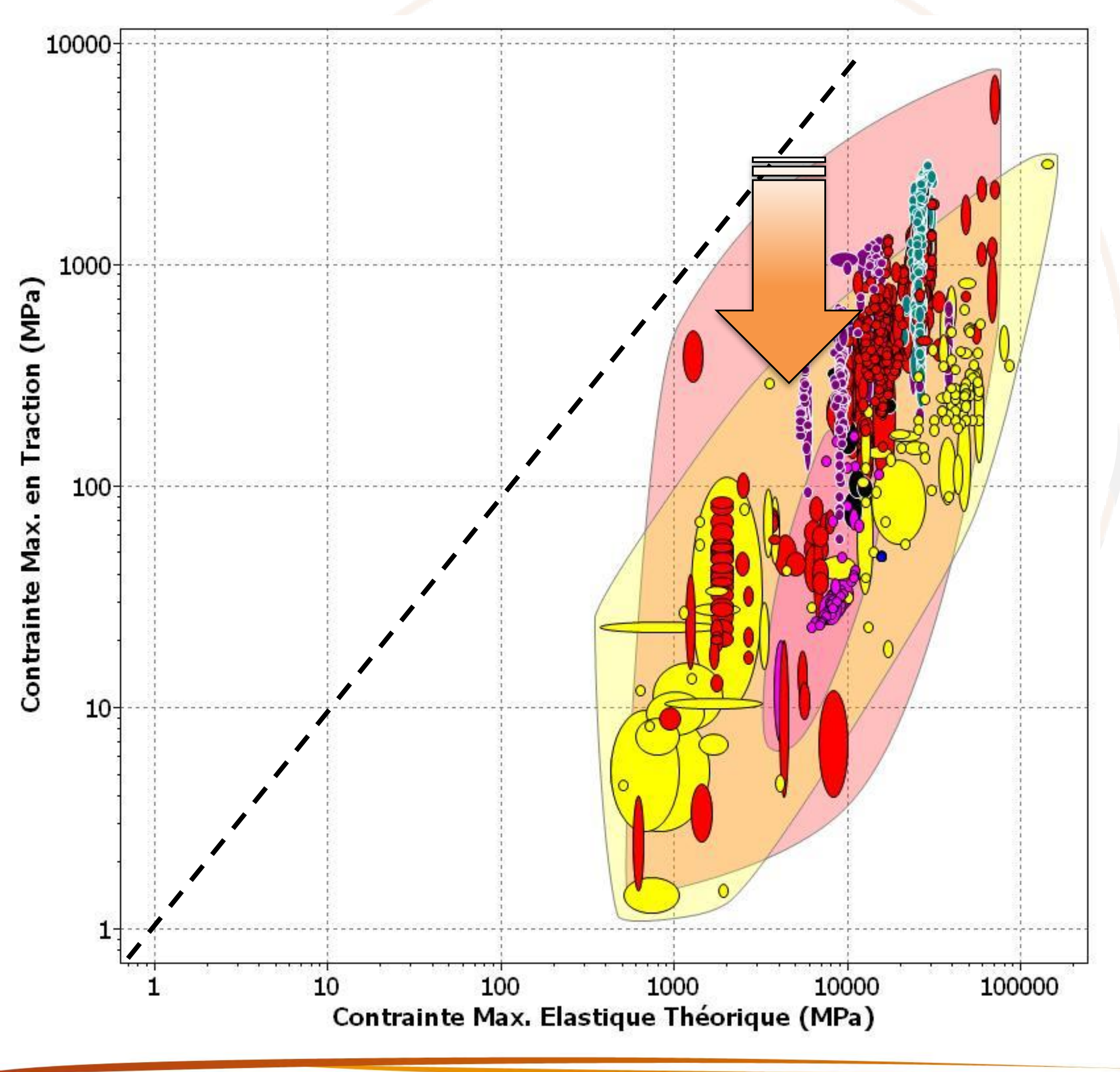
- Force maximale de rappel: au-delà rupture

- On montre* que:

$$\sigma_{rupture} = \frac{E}{8}$$

** en Master Matériaux…*

Contrainte à la rupture élastique vs réelle



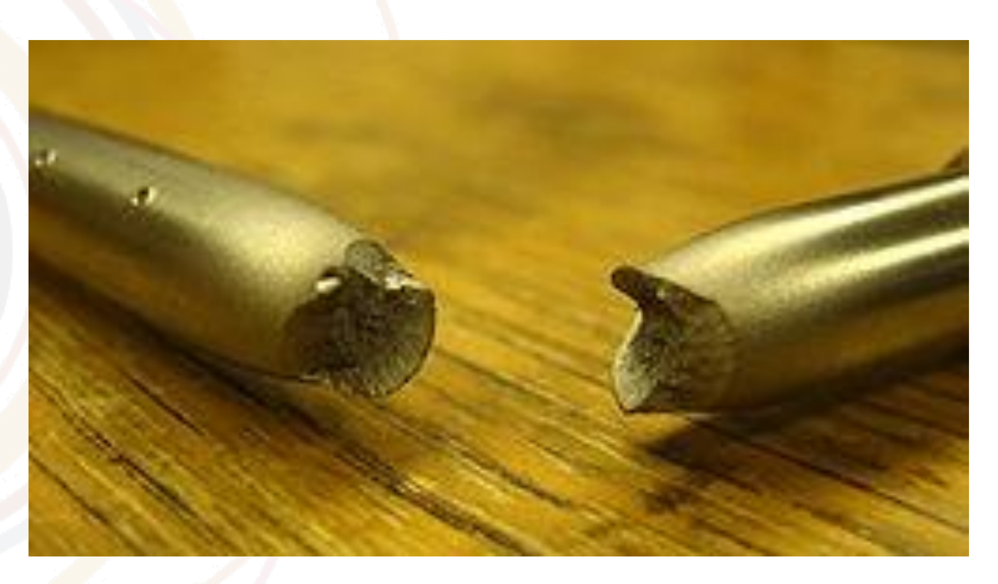
- Rupture intervient **avant** la limite élastique théorique
  - jusqu'à 3 ordres de grandeurs d'écart pour les métaux
- Cause : présence de **défauts** dans les structures
  - **Céramiques**: fissures, porosités
  - **Métaux**: dislocations

La rupture ductile

- Rupture après une **importante déformation**

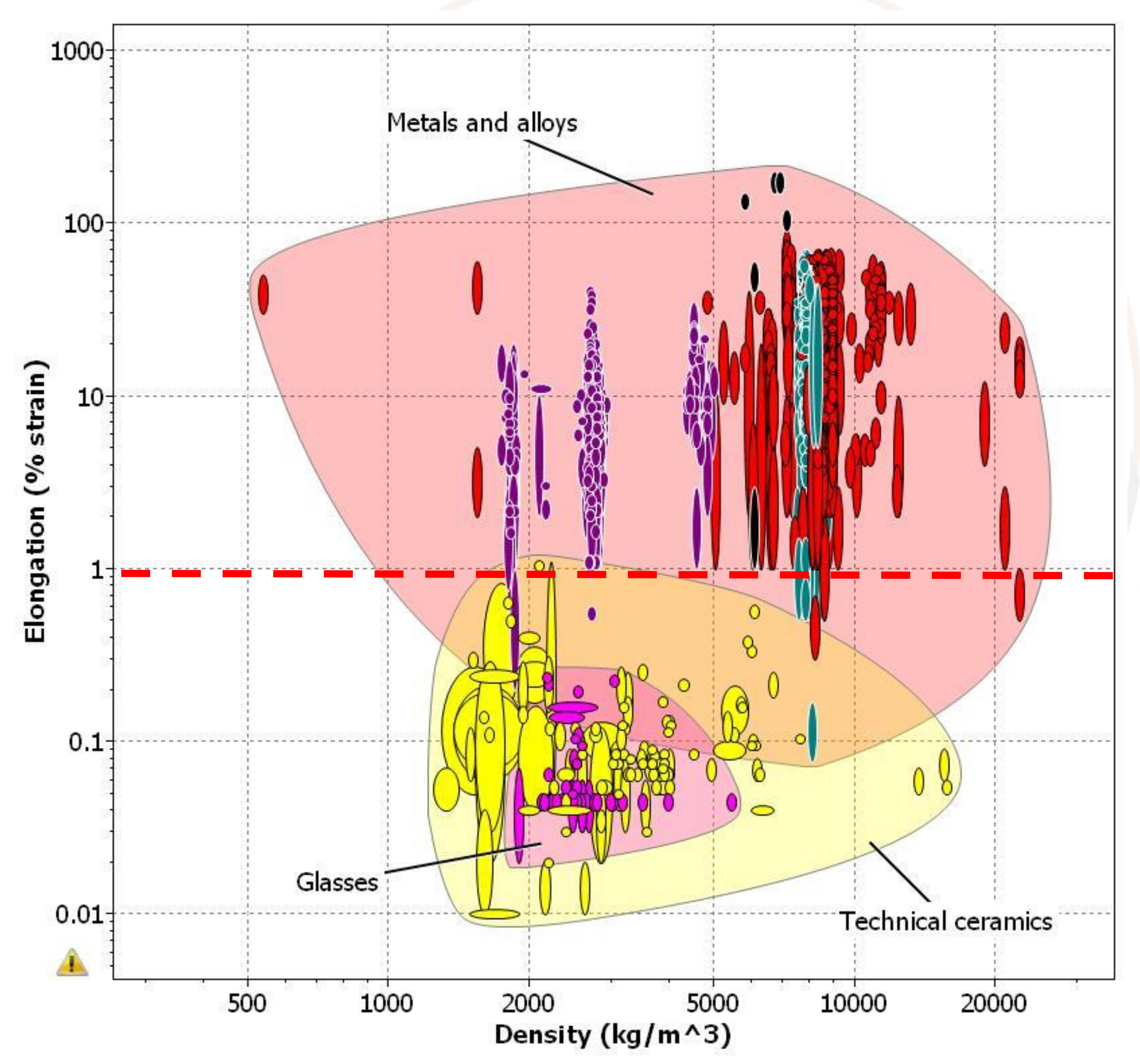


Oh, International Journal of Pressure Vessels and Piping (2007)



Wikipedia, article « Fracture »

Capacité à se déformer: A%

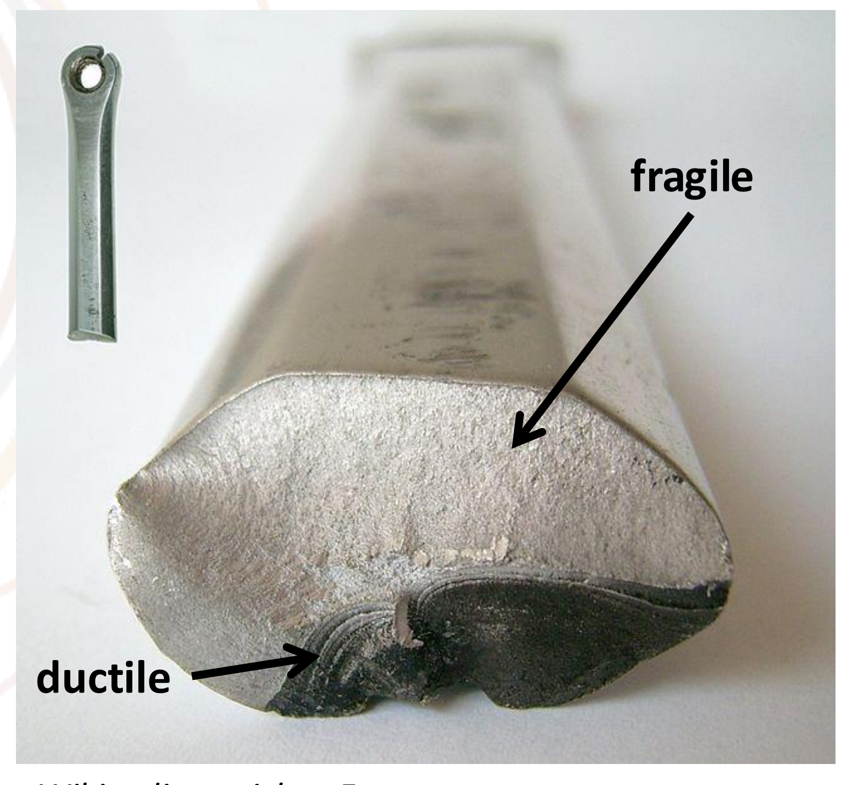


- Alliages métalliques: **plus de 10%**
- Verres et Céramiques: **moins de 1%**

La rupture fragile

- Rupture **brutale**, après peu de déformation
- **Propagation** soudaine d'un **défaut** (fissure) critique



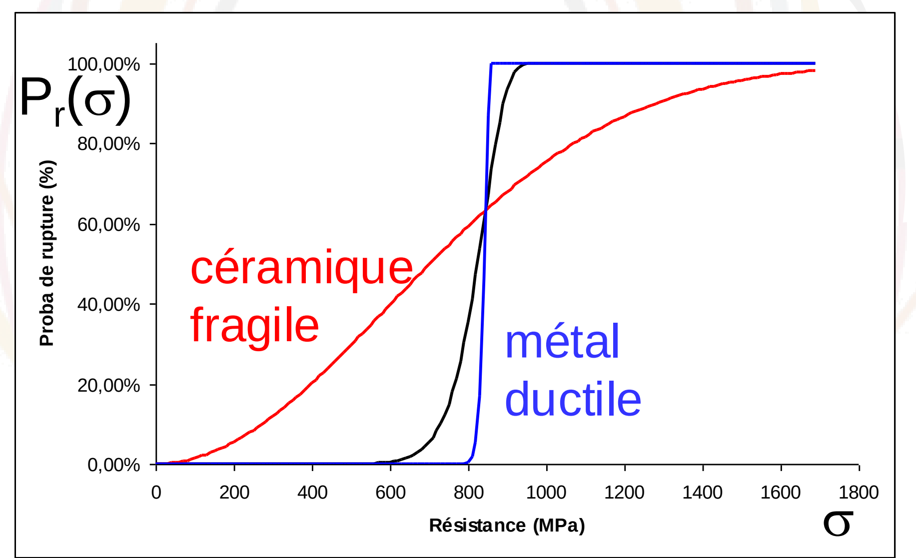


Wikipedia, article « Fracture »

La rupture des fragiles: approche statistique de Weibull

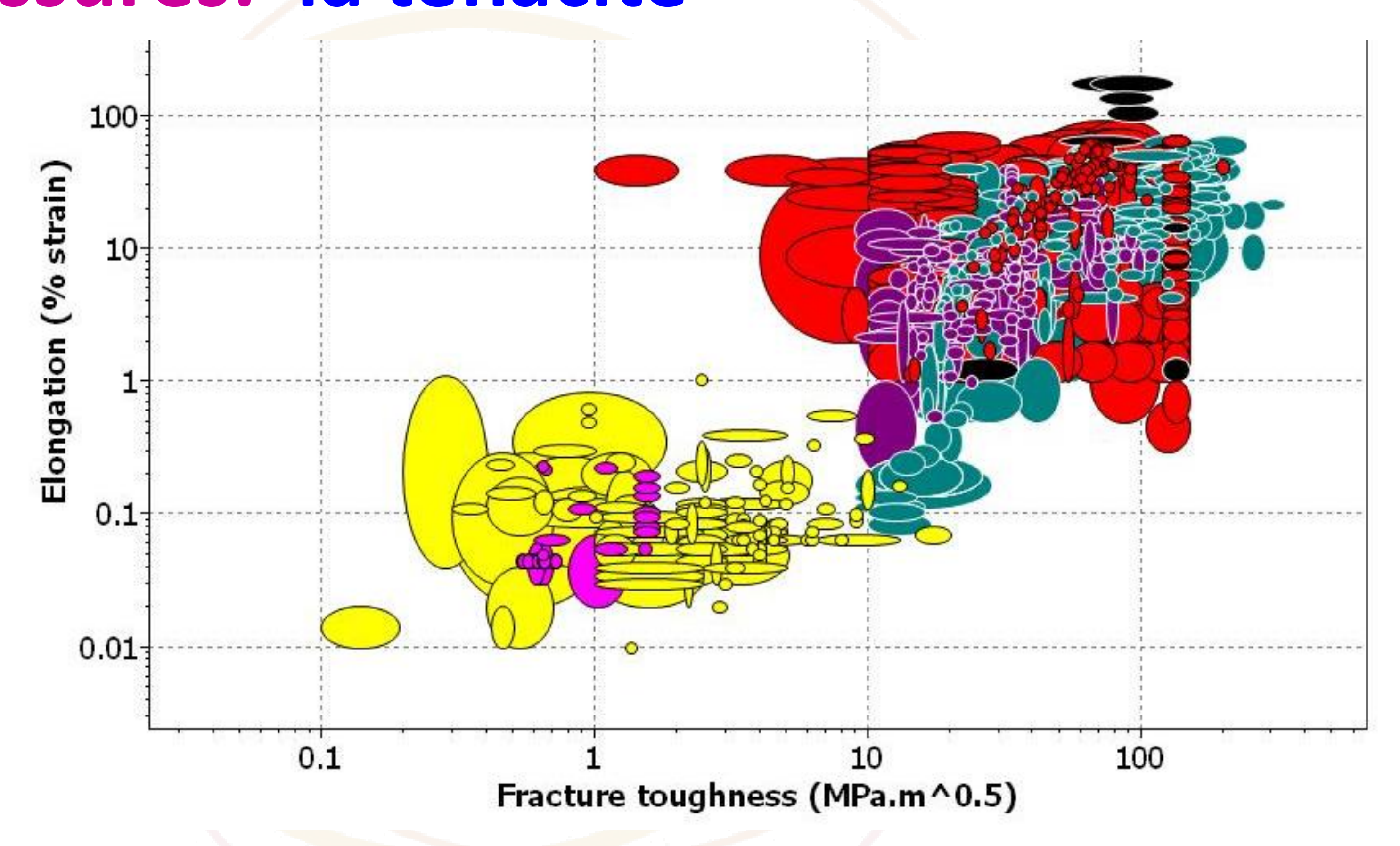
➢ Théorie du **maillon faible**: la rupture est conditionnée par la probabilité de présence d'un maillon faible

➢ **Dispersion** des valeurs de résistance:



➢ La résistance des matériaux fragiles dépend du volume de la pièce, la conception doit prendre en compte un aspect risque

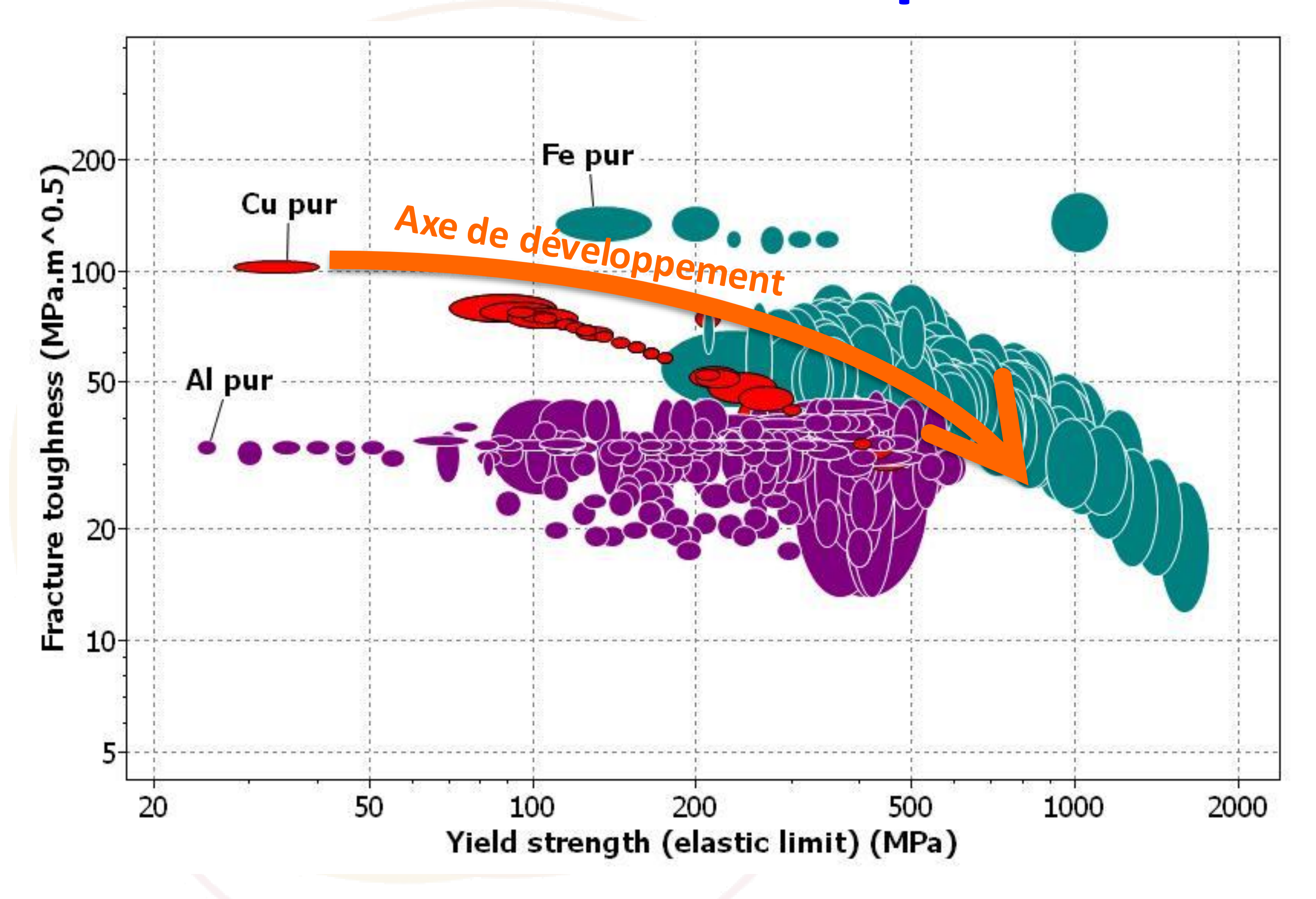
Capacité à résister à la propagation de fissures: **la ténacité**



- La ténacité des **céramiques** est faible: rupture **fragile**

- La ténacité des **métaux** est élevée, rupture peut être **ductile**

Résistance vs. Ténacité: compromis



- Les métaux sont naturellement ductile: **les durcir sans fragiliser (cf cours Elaboration)**

Résistance vs. Ténacité: compromis

Composites matrice SiC

x 10

SiC massif

Fracture toughness (MPa.m^0.5)

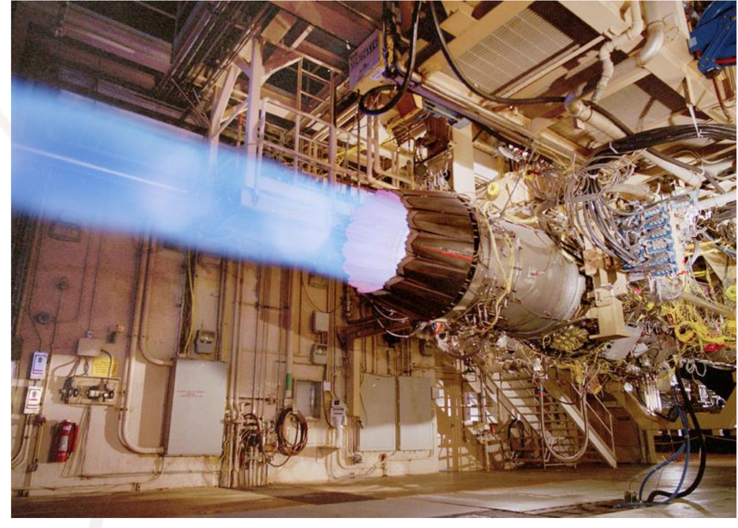
100

10

1

20 50 100 200 500 1000

Yield strength (elastic limit) (MPa)



Tuyères, chambre de combustion, cône de sortie, aubes…:

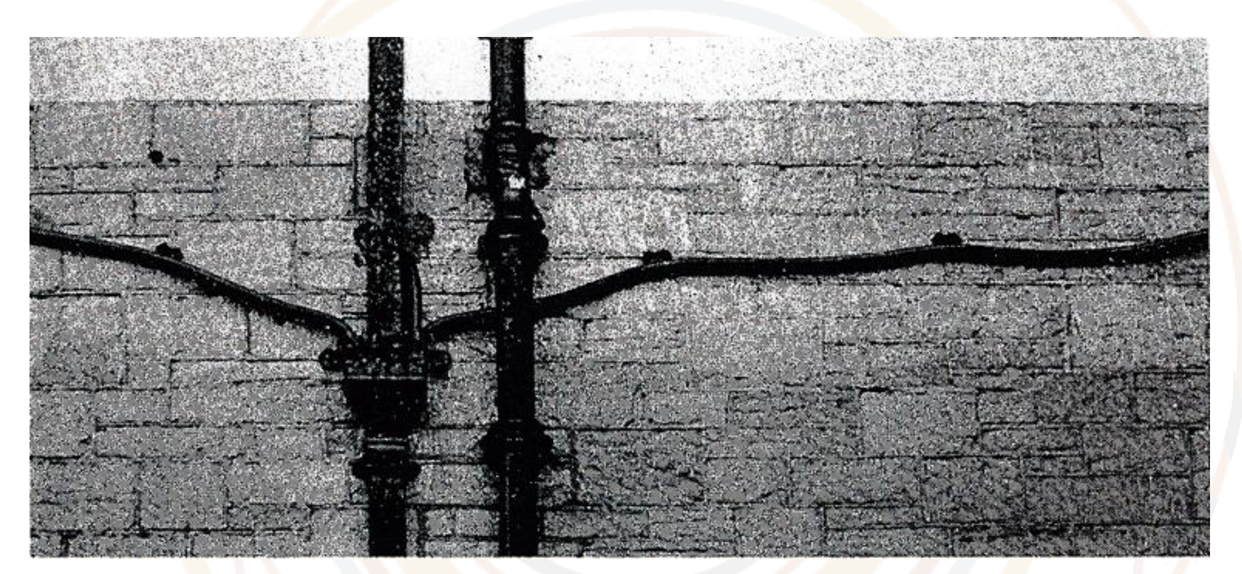
- travail à chaud,
- atmosphère oxydante,
- forte contrainte…

➢ Les céramiques sont naturellement fragile: **les « ductiliser »**

Influence de la température
Le fluage

Le Fluage

➢ Déformation sous contrainte et **à chaud** (T > 1/3 T_{fus})



Fluage de tuyauterie en plomb sous leur propre poids



Aubes de turbine Concorde

➢ Déformation dépendante du temps, l'endommagement est associé à un déplacement de la matière (diffusion)

Critère de conception en fluage

➢ Développement des aubes de turbines



Source: Nasa

cf. cours du Master Matériaux

Mise en forme par fluage

➢ Mise en forme à chaud: emboutissage, laminage, filage, forgeage …



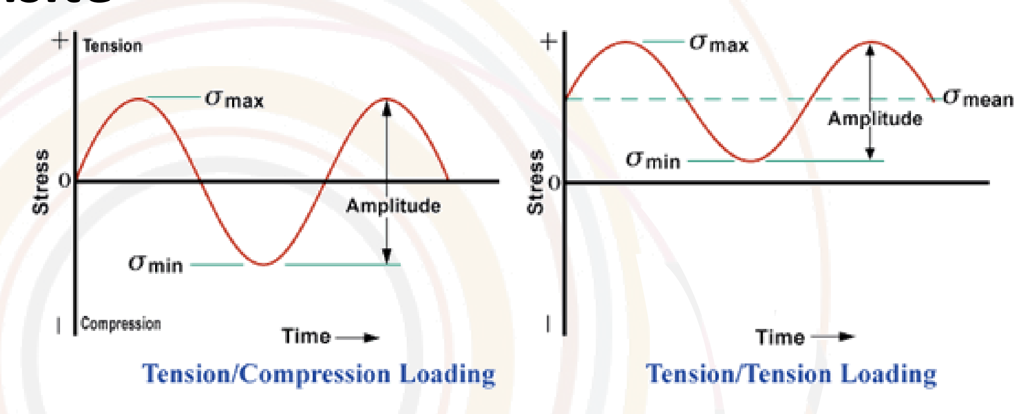
Source: Corus BCSA sur Youtube

cf. cours du Master Matériaux

Influence du temps: la fatigue

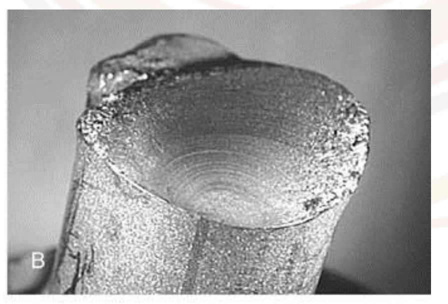
Sollicitation en fatigue

➢ La sollicitation réelle est rarement monotone: plutôt **cyclique** et de **faible intensité**

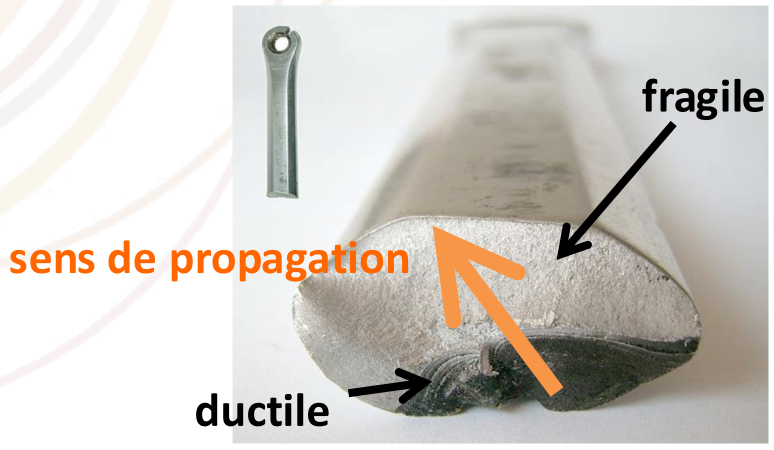


➢ Rupture intervient après un temps de **propagation stable** d'un défaut





Lee, The Journal of Arthroplasty - 2001



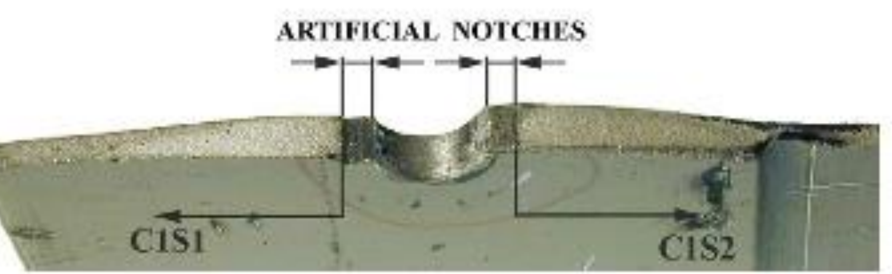
Wikipedia, article « Fracture »

Suivi de fissures stables en fatigue

➢ Les cycles de pressurisation des avions induisent une propagation en **fatigue** de fissures **autour des rivets**



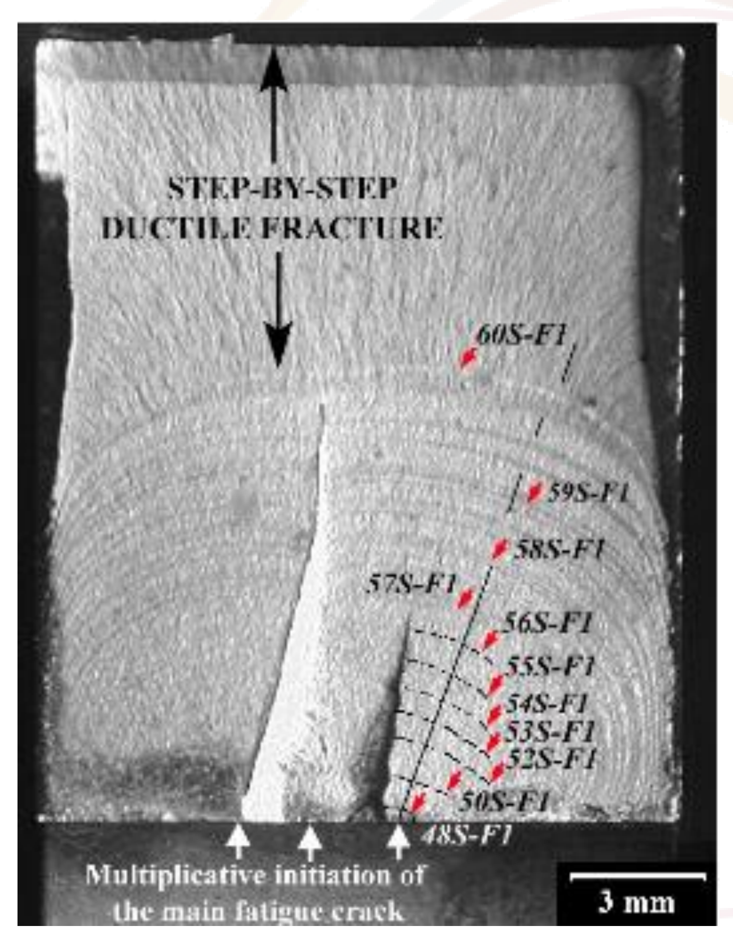




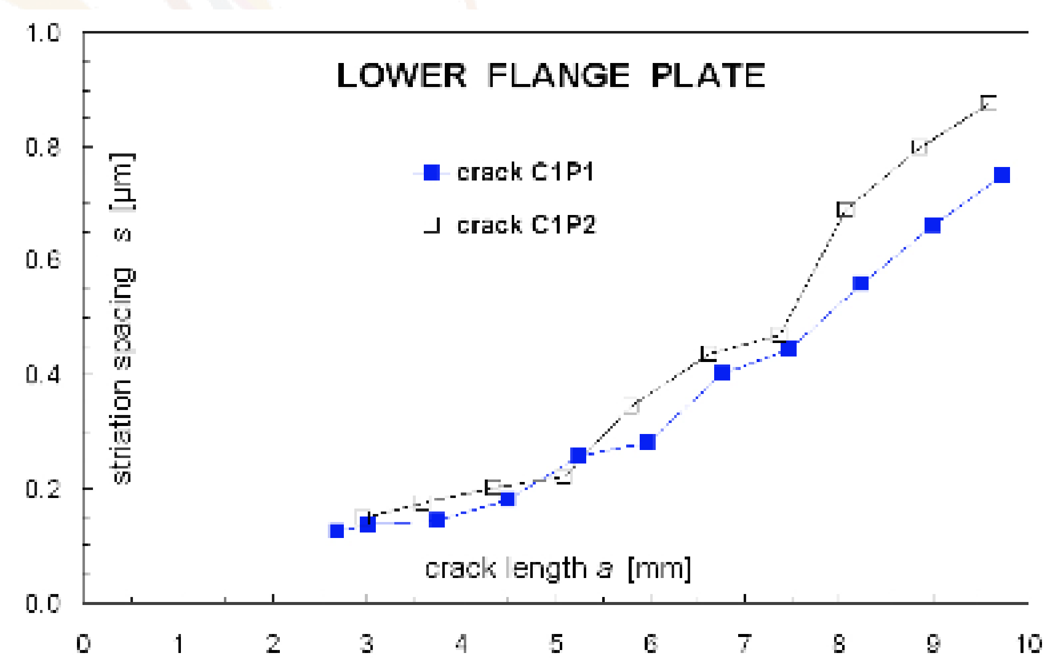
Siegl (2007)

Suivi de fissures stables en fatigue

- A chaque cycle, la fissure avance: **striation**



Siegl (2007)



- La **vitesse augmente** avec la longueur de fissure

En conclusion….

Ce qu'il faut retenir…

➢ Les métaux purs sont ductiles et tenaces

- faible limite élastique, allongement à rupture élevé
- leur développement repose sur une augmentation de leur résistance
- recherche d'un compromis résistance/ductilité

➢ Les céramiques sont élastiques et fragiles

- limite élastique élevée, peu d'allongement, faible ténacité
- sensible à la présence de défauts, conception probabiliste
- leur développement repose sur une augmentation de la ténacité (composites)

➢ Des propriétés affectées par:

- L'environnement (température, milieu – corrosion, etc)
- La présence de défauts (dislocations, porosités, fissures…)
- Les modes de sollicitation (cycles, vitesse…)